

# APLICACIÓN DE MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL EN PROYECCIONES DE LA COBERTURA BOSCOSEA Y DE CAPTURA DE CO<sub>2</sub>, PARA LA VENTA DE CERTIFICADOS DE CARBONO EN GUATEMALA, PERÍODO 2017-2030

*Application of Linear Regression Models in Projections of the Wood Coverage and CO<sub>2</sub> Capture, for the Sale Of Carbon Certificates in Guatemala, Period 2017-2030*

**Víctor Manuel Aceituno Melgar**

Mtro. en Estadística Aplicada

Correspondencia al autor: [victor.aceituno@yahoo.com](mailto:victor.aceituno@yahoo.com)

Recibido: 08 de marzo 2018 | Revisado: 14 de marzo 2018 | Aprobado: 16 de marzo 2018

Asesorado por: Mtro. en Economía Ambiental y de Recursos Naturales

**Víctor Manuel Aceituno Quezada** [vimaceituzada@hotmail.com](mailto:vimaceituzada@hotmail.com)

## Resumen

Se estima el potencial de venta de certificados por fijación de carbono en bosques conservados de Guatemala según el modelo REDD+. Se aplican modelos de regresión con base en inventarios de cobertura boscosa, estimándose para 2030, un área forestal de  $2.67 \times 10^6$  hectáreas.

Se calcula un modelo lineal generalizado con esquema AR(1) sobre el área reforestada acumulada durante el período 1998 - 2016, según el Programa de incentivos forestales (PINFOR). Con esa tendencia, se estiman en  $2.39 \times 10^5$  hectáreas reforestadas en 2030, con costo promedio de Q14,362/ha, siendo insuficiente para compensar la pérdida de cobertura boscosa para ese año.

Si al 2030 se reforestan en el país como mínimo 43,806 hectáreas/año bajo el esquema REDD+, se estima una fijación de  $1.41 \times 10^8$  toneladas de CO<sub>2</sub> entre 2018 y 2030, con potencial financiero de Q5,308 millones para inversión en proyectos de reforestación y conservación de bosques.

## Palabras clave

Modelos de regresión, cobertura boscosa, captura de CO<sub>2</sub>, certificados de carbono, REDD+.

## Abstract

*The sales potential of carbon certificates through CO<sub>2</sub> forest absorption in Guatemala managed with the REDD+ model are estimated. Regression models based on forest coverage inventories are calculated. By 2030, the forest surface will have decreased to  $2.67 \times 10^6$  hectares.*

*In addition, a generalized linear model with the AR(1) scheme for the accumulated reforested area during the period 1998-2016 by PINFOR is calculated. If the observed trend continues,  $2.39 \times 10^5$  hectares will have been reforested by 2030, with cost of Q14,362/hectare. The current reforestation rate is insufficient to compensate the forest surface loss by 2030.*

*If a minimum of 43,806 hectares/year are reforested by 2030, operating with the REDD+ scheme, Guatemalan forests will be able to absorb  $1.41 \times 10^8$  tons of CO<sub>2</sub> during 2018-2030. That represents a potential of Q5,308 million, which can be invested in reforestation projects and forest conservation.*

## Keywords

*Regression models, CO<sub>2</sub> capture, carbon certificates, REDD+.*

## Introducción

El Protocolo de Kyoto, el Acuerdo de París y la Agenda 2030 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas buscan detener el cambio climático y mitigar sus efectos mediante la reducción de emisiones de  $\text{CO}_2$ .

En Guatemala, se deforestan anualmente 132,137 ha. Los resultados de reforestación del PINFOR (93,432 ha/año), son insuficientes para compensar esa pérdida. Se desaprovecha la oportunidad de vender certificados de carbono a través del mecanismo REDD+, cuyos ingresos pueden invertirse en programas de reforestación y beneficiar económicamente a las comunidades rurales.

## Desarrollo del estudio

El estudio tiene un diseño no experimental. Se utiliza información de dinámica forestal en Guatemala, publicada por el Instituto Nacional de Bosques, el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales y el Instituto Nacional de Estadística, durante 1991, 1996, 2001, 2006, 2010 y 2012.

Con esa información, se estiman modelos de regresión de la cobertura boscosa a través del método de mínimos cuadrados cuyos residuos cumplen con los supuestos de normalidad, homocedasticidad y ausencia de autocorrelación serial. Con los modelos obtenidos, se estima el área con cobertura forestal en Guatemala para el período 2018-2030.

Las pruebas usadas para verificar los supuestos del modelo son: Shapiro-Wilk para normalidad, Brown-Forsythe para la homogeneidad de varianza y la prueba de rachas para la autocorrelación.

A partir del modelo de cobertura boscosa en el tiempo y de la fijación de  $\text{CO}_2$ , se proyecta el modelo de captura de carbono en el país, considerando que una hectárea de bosques absorbe 392 toneladas de  $\text{CO}_2$  (Castellanos, 2011).

La tasa de deforestación se estima con la primera derivada del modelo de cobertura forestal con respecto al tiempo. La emisión del  $\text{CO}_2$  por deforestación se calcula al multiplicar la tasa de defo-

restación anual por el factor de absorción del gas por hectárea de bosque. Dicho valor constituye la línea base del proyecto REDD+. Con el plan de reforestación que se propone hasta el año 2030, se estima el  $\text{CO}_2$  fijado hasta ese año, donde la pérdida neta de bosque es cero. La diferencia entre el área boscosa al conservar el bosque y la línea base (sin intervención) representa una cantidad de  $\text{CO}_2$  no emitido, constituyendo el potencial de venta de certificados de carbono del proyecto.

La venta total de carbono se estima al multiplicar el precio histórico de los certificados por la masa de  $\text{CO}_2$  fijada con el manejo de bosques REDD+. El análisis estadístico se realiza con SigmaPlot10, Eviews9, Microsoft Excel y Matlab.

## Resultados obtenidos

### a. Modelos de regresión de la cobertura boscosa

La proyección de área forestal al año 2030, se estima en  $2.67 \times 10^6$  hectáreas distribuidas en 58.6 % de bosques latifoliados, 25.4 % de coníferas y 16.0 % de mixtos. Su tendencia se muestra en la figura 1.

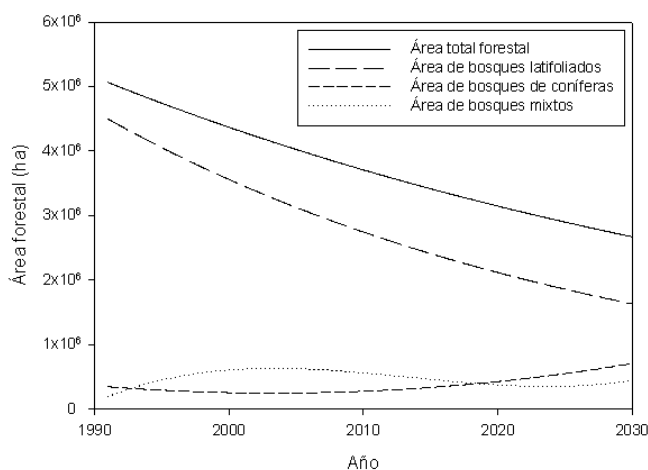


Figura 1. Área forestal de Guatemala por clase de bosque al año 2030

Las curvas de la figura 1 son la representación de los modelos que se presentan a continuación:

Modelo del área forestal total ( $R^2=0.97$ ):

$$y=5063689\exp[-0.02(x-1991)] \quad (1)$$

donde es el área forestal estimada y es el año.

Modelo del área de bosques latifoliados ( $R^2=0.98$ ):

$$y=4496640\exp[-0.03(x-1991)] \quad (2)$$

Modelo del área de bosques de coníferas ( $R^2=0.99$ ):

$$y=347475 - 1588(x-1991) + 643(x-1991)^2 \quad (3)$$

Modelo del área de bosques mixtos( $R^2=0.999$ ):

$$y=194297 - 81169(x-1991) - 4520(x-1991)^2 + 67(x-1991)^3 \quad (4)$$

#### b. Modelo de regresión de la reforestación

El modelo lineal generalizado para la reforestación con el esquema AR(1) es ( $R^2=0.998$ ):

$$y_t=0.89y_{t-1}+577+7320[(x_t-1998)-0.89(x_t-1997)] \quad (5)$$

Si persiste la tasa de reforestación del PINFOR, al 2030 se estiman 239,154 ha reforestadas.

#### c. Modelo de la fijación de $CO_2$ por bosques

El modelo del  $CO_2$  fijado ( $R^2=0.97$ ) es:

$$y=1984966045\exp[-0.02(x-1991)] \quad (6)$$

#### d. Estimación de la venta de certificados de carbono

Operar con REDD+ evitaría la emisión de  $1.41 \times 10^8$  toneladas de  $CO_2$ , equivalentes a Q5,308 millones. La tabla I muestra el modelo de reforestación para que la pérdida neta de la cobertura boscosa sea cero.

Tabla I. *Tasa de reforestación necesaria para detener la pérdida neta de bosque al 2030*

Año	Pérdida bosque (ha/año)	Tasa de reforestación (ha/año)	Pérdida neta bosque (ha/año)
2018	53,334	11,596	41,738
2021	50,774	19,649	31,125
2024	48,336	27,701	20,635
2027	46,015	35,754	10,262
2030	43,806	43,806	0

## Discusión de resultados

Los modelos (1-4) son significativos ( $p<0.05$ ) para estimar el área forestal total, y por tipo de bosque al 95 % de confianza. Dichos modelos cumplen con los supuestos del modelo de regresión clásico ( $p>0.05$ ), por lo tanto, pueden usarse para realizar proyecciones quinquenales hasta el año 2030.

El comportamiento modelado para las clases de bosques concuerda con lo reportado en publicaciones (IARNA, 2012). Se observa una mayor tendencia de pérdida de bosques latifoliados, seguido por bosques mixtos. A diferencia de esos bosques, los de coníferas tienden a aumentar. Esa tendencia fue reportada por Redo, Grau, Aide y Clark en 2012. La pérdida de bosques latifoliados se puede explicar por la disminución de bosques en Petén (mayoritariamente latifoliados). Por el contrario, el aumento de coníferas, se presenta principalmente por la reforestación a través del PINFOR, en las verapaces.

De no aumentar los esfuerzos para detener la pérdida de cobertura boscosa, se proyecta que el área forestal del país en 2030 sea sólo el 52.75 % del área forestal con respecto a 1991.

Para modelar el área reforestada acumulada por el PINFOR entre 1998 y 2016 se usa el modelo lineal generalizado (5), pues el método de mínimos cuadrados no satisface los supuestos de homocedasticidad y ausencia de autocorrelación. La tasa actual de reforestación es insuficiente para detener la pérdida de bosque al año 2030. Como mínimo, deben reforestarse 43,806 ha/año (tabla I). El modelo (6) muestra que cada año disminuye el  $CO_2$  fijado por causa de la deforestación.

En la figura 2, se comparan dos escenarios: en el escenario base, se estiman las emisiones de  $CO_2$  si no se buscan mecanismos para detener la pérdida de cobertura boscosa. En el escenario de operación de un proyecto REDD+, se tiene un objetivo para disminuir esa deforestación. La diferencia entre el área boscosa al conservar el bosque y la línea base (sin intervención) representa una cantidad de  $CO_2$

que no se emite constituyendo el potencial de venta de certificados de carbono del proyecto.

Se proyecta que la venta sea de  $1.41 \times 10^8$  toneladas de  $\text{CO}_2$  entre 2018 y 2030 al operar con un proyecto REDD+. Si el precio es de \$5/tonelada de  $\text{CO}_2$ , \$705.8 millones se podrían utilizar en planes de reforestación y conservación de bosques.

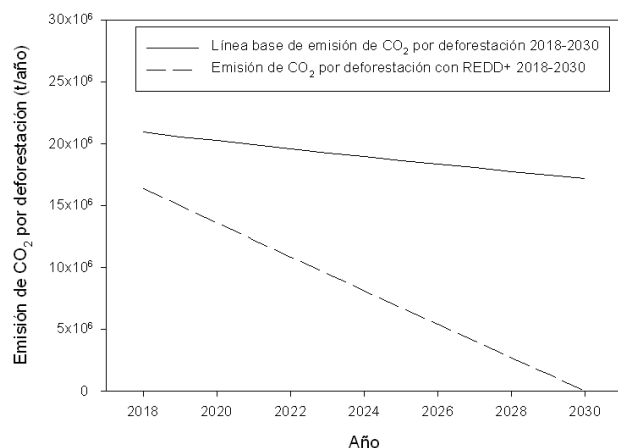


Figura 2. Emisión de  $\text{CO}_2$  con REDD+

## Conclusiones

1. En el 2030, el área forestal de Guatemala se estima en  $2.67 \times 10^6$  hectáreas, distribuidas así: bosques latifoliados (58.6 %), bosques de coníferas (25.4 %) y bosques mixtos (16 %).
2. Para detener la pérdida de la cobertura boscosa del país en el 2030, se debe reforestar a una tasa mínima de 43,806 hectáreas/año.
3. De mantenerse la tasa de deforestación proyectada para 2030, se estima la emisión de  $1.72 \times 10^7$  toneladas de  $\text{CO}_2$ .
4. Se estima que la conservación boscosa con un proyecto REDD+ permite la fijación y venta de  $1.41 \times 10^8$  toneladas de  $\text{CO}_2$  entre 2018 y 2030, con un potencial de Q5,308 millones destinados para inversión en proyectos de reforestación, mantenimiento y conservación de bosques.

## Recomendaciones

1. El INAB debe actualizar con mayor frecuencia las estadísticas de la dinámica forestal del país.
2. Los modelos que se presentan en esta investigación deben actualizarse a medida que se generen más estadísticas del área forestal.

## Referencias bibliográficas

- Castellanos, E. (2011). *Elaboración del primer mapa nacional sobre el carbono capturado por plantaciones y bosques naturales de Guatemala*. Proyecto FODECYT No. 08-2008.
- Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar, (2012). *Análisis sistémico de la deforestación en Guatemala y propuesta de políticas para revertirla*. Guatemala. Serie técnica No. 38.
- Redo, D., Grau, H., Aide, M. y Clark, M. *Asymmetric forest transition driven by the interaction of socioeconomic development and environmental heterogeneity in Central America*. Proceeding of the National Academy of Science. 109 (2012), 8839-8844. doi: 10.1073/pnas.1201664109.

## Información del autor

Ingeniero Químico, Víctor Manuel Aceituno Melgar, egresado de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2010.

Maestro en Artes en Estadística Aplicada, Escuela de Estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2018.

Afiliación laboral: CEMEX, Guatemala, S.A.